

DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-171-176

УДК 536.24

Исследование магнитного режима трехфазного трансформатора с симметричным магнитопроводом рамной конструкции

Канд. техн. наук, доц. А. А. Мазуренко¹⁾, студ. Е. Т. Смирнов¹⁾¹⁾Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь)© Белорусский национальный технический университет, 2017
Belarusian National Technical University, 2017

Реферат. Исследован магнитный режим трехфазного трансформатора с симметричным магнитопроводом рамной конструкции на схемной модели. Схема состояла из трех нелинейных катушек, соединенных звездой без нулевого провода. Вебер-амперные характеристики катушек соответствовали одноименным параметрам отдельных рам магнитопровода. Принимали, что магнитный поток каждой рамы замыкается на себя, не переходя в другую раму магнитопровода. Электромагнитное состояние схемы замещения описывали системой дифференциальных уравнений, которые решали с помощью стандартной программы MathCad. В результате рассчитаны функции магнитной индукции рамы и намагничивающего тока и их гармонические составы, определена зависимость реальной амплитуды индукции магнитного поля от амплитуды индукции основной гармоники. В процессе проведения экспериментов выявлено, что: амплитуда индукции основной гармоники магнитного поля в рамках магнитопровода больше расчетного значения индукции на 15,5 %; вследствие нелинейности вебер-амперных характеристик рам и свойств трехфазной системы в функциях магнитной индукции отдельных рам возникают гармонические составляющие, кратные трем; высшие гармоники функции магнитной индукции рамы, накладываясь на основную гармонику, уменьшают реальную амплитуду индукции магнитного поля практически до расчетного значения индукции в рабочем диапазоне реальной амплитуды, при этом коэффициенты высших гармоник изменяются незначительно; в намагничивающих токах отсутствуют гармонические составляющие, кратные трем.

Ключевые слова: трехфазный трансформатор, магнитопровод, рамная конструкция, высшие гармоники, магнитный режим

Для цитирования: Мазуренко, А. А. Исследование режима трехфазного трансформатора с симметричным магнитопроводом рамной конструкции / А. А. Мазуренко, Е. Т. Смирнов // *Наука и техника*. 2017. Т. 16, № 2. С. 171–176. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-171-176

Investigation of Magnetic Mode for 3-Phase Transformer with Symmetrical Magnetic Conductor of Frame Design

A. A. Mazurenko¹⁾, E. T. Smirnov¹⁾¹⁾Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus)

Abstract. Magnetic mode for 3-phase transformer with symmetrical magnetic conductor of frame design has been investigated on schematic model. The scheme consists of three non-linear coils having star-connection without zero wire. Weber-ampere characteristics correspond to similar parameters of separate frames of a magnetic conductor. It has been accepted that a magnetic flow of every frame is closed on itself without passing into other frame of the magnetic conductor. Electromagnetic state of equivalent diagram has been described by a system of differential equations which were solved with the help of MathCad program. Investigations have resulted in calculation of functions for magnetic frame induction and magnetizing

Адрес для переписки

Мазуренко Анатолий Аркадьевич
Белорусский национальный технический университет
просп. Независимости, 65/2,
220013, г. Минск, Республика Беларусь
Тел.: +375 17 292-71-93
EiE@bntu.by

Address for correspondence

Mazurenko Anatoliy A.
Belarusian National Technical University
65/2 Nezavisimosty Ave.,
220013, Minsk, Republic of Belarus
Tel.: +375 17 292-71-93
EiE@bntu.by

current and their harmonic compositions; dependence of actual amplitude for magnetic field induction on amplitude of the main harmonic induction has been determined in the paper. While executing experiments it has been revealed the following: induction amplitude of the main harmonic in the magnetic field within frames of the magnetic conductor is higher in comparison with the design induction value by 15.5 %; due to non-linearity of weber-ampere characteristics in frames and properties of 3-phase system harmonic components, which are multiple of three, are initiated in the functions of magnetic induction for separate frames; high-order harmonics of function for magnetic frame induction being imposed on the main harmonic decrease an actual amplitude of magnetic field induction practically up to the design induction value within the operational range of the actual amplitude and in this context coefficients of high-order harmonics change insignificantly; harmonic components, which are multiple of three, are absent in magnetizing currents.

Keywords: three-phase transformer, magnetic conductor, frame design, high-order harmonics, magnetic mode

For citation: Mazurenko A. A., Smirnov E. T. (2017) Investigation of Magnetic Mode for 3-Phase Transformer with Symmetrical Magnetic Conductor of Frame Design. *Science and Technique*. 16 (2), 171–176. DOI: 10.21122/2227-1031-2017-16-2-171–176 (in Russian)

Введение

В процессе проведения экспериментальных работ авторами выполнено исследование магнитного режима в магнитопроводе рамной конструкции трехфазного трансформатора. Конструктивно магнитопровод состоял из трех одинаковых О-образных рам [1], изготовленных путем намотки ленты из холоднокатаной стали [2]. Ширина ленты при намотке изменялась таким образом, чтобы отдельные рамы в сечении имели форму полукруга. Смежные рамы стыковались боковыми плоскостями, образуя стержни магнитопровода практически с круговым сечением. Такая конструкция имеет свои особенности [3]:

- 1) магнитная система является полностью симметричной по фазам;
- 2) отсутствие стыков в продольном направлении значительно уменьшает продольное магнитное сопротивление;
- 3) наличие стыка между боковыми плоскостями рам препятствует переходу магнитного потока из одной рамы в другую.

Своеобразие формы магнитопровода рамной конструкции обуславливает магнитный режим, который существенно отличается от режимов известных форм магнитопроводов и поэтому требует специального рассмотрения [4]. Внешний вид магнитопровода представлен на рис. 1.

Пространственный магнитопровод рамной конструкции является симметричным. Из этого следует, что при симметричном первичном напряжении трехфазного трансформатора параметры магнитного поля в отдельных рамах будут изменяться одинаково во времени со сдвигом на $1/3$ периода. В конструкции магни-

топровода между рамами имеется незначительный воздушный зазор, магнитное сопротивление которого во много раз превышает продольное магнитное сопротивление. Это приводит к тому, что магнитные потоки практически не переходят из одной рамы в другую, а замыкаются по пути наименьшего сопротивления, т. е. по контурам рам. Таким образом, отдельные рамы образуют самостоятельные контуры магнитной цепи, по которым замыкаются магнитные потоки.

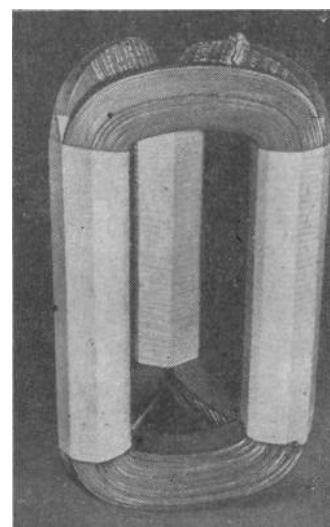


Рис. 1. Внешний вид магнитопровода рамной конструкции

Fig. 1. External view of magnetic conductor having frame design

Анализ магнитного режима магнитопровода рамной конструкции

Магнитная цепь магнитопровода может быть представлена эквивалентной схемой замещения с нелинейными магнитными сопротивлениями (рис. 2) [5].

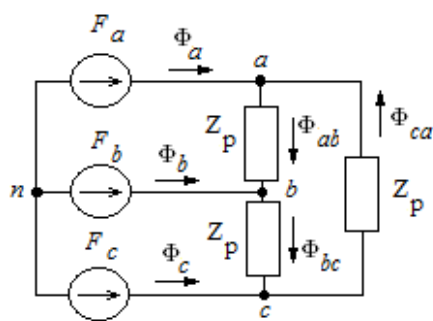


Рис. 2. Эквивалентная схема магнитопровода рамной конструкции при отсутствии магнитной связи между рамами: Z_p – магнитное сопротивление рамы; F_a, F_b, F_c – магнитодвижущая сила обмоток фаз трансформатора; a, b, c – фазы; n – нейтральная точка; Φ_a, Φ_b, Φ_c – фазное значение; $\Phi_{ab}, \Phi_{bc}, \Phi_{ca}$ – межфазное значение

Fig. 2. Equivalent diagram of magnetic conductor having frame design without magnetic coupling between frames: Z_p – magnetic resistance of frame; F_a, F_b, F_c – magneto-motive force in windings of transformer phases; a, b, c – phases; n – neutral point; Φ_a, Φ_b, Φ_c – phase value; $\Phi_{ab}, \Phi_{bc}, \Phi_{ca}$ – inter-phase value

Нелинейные вебер-амперные характеристики магнитных сопротивлений рам $u(\Phi)$ рассчитываются по основной кривой намагничивания материала исходя из геометрических размеров магнитопровода [6, 7]:

$$u_a = a\Phi_a + b\Phi_a^9; \quad (1)$$

$$u_b = a\Phi_b + b\Phi_b^9; \quad (2)$$

$$u_c = a\Phi_c + b\Phi_c^9, \quad (3)$$

где Φ_a, Φ_b, Φ_c – мгновенное значение магнитного потока для фаз a, b, c .

В принятой схеме замещения линейные магнитные потоки стержней $\Phi_a(t), \Phi_b(t), \Phi_c(t)$ определяются фазными напряжениями трансформатора; они симметричны и имеют синусоидальную форму. Амплитудные значения магнитных потоков находим по формуле

$$\Phi_m = \frac{U_{\max}}{w\omega}, \quad (4)$$

где U_{\max} – максимальное фазное напряжение; w – количество витков; ω – угловая частота.

Расчетную амплитуду магнитной индукции в стержнях магнитопровода B_{mr} определяли в предположении, что магнитные потоки равномерно распределены по сечению стержня

$$B_{mr} = \frac{\Phi_m}{2S}, \quad (5)$$

где Φ_m – магнитный поток; S – сечение стержня.

Исходя из свойства симметричной трехфазной системы, амплитуды основной гармоники магнитных потоков в рамах Φ_{abm} будут меньше амплитуды магнитных потоков стержней Φ_{am} в $\sqrt{3}$ раз:

$$\Phi_{abm} = \frac{1}{\sqrt{3}} \Phi_{am}. \quad (6)$$

Соответственно амплитуда индукции B_{1m} основной гармоники магнитного поля в рамах составит

$$B_{1m} = \frac{\Phi_{abm}}{S} = \frac{2}{\sqrt{3}} B_{mr} = 1,15 B_{mr}. \quad (7)$$

Своеобразие магнитного режима заключается в том, что нелинейность вебер-амперных характеристик магнитных сопротивлений рам приведет к искажению формы кривых магнитных потоков рам $\Phi_{ab}(t), \Phi_{bc}(t), \Phi_{ca}(t)$ и появлению в их спектрах высших гармоник, кратных трем. Эти гармоники в смежных полустержнях будут направлены встречно и не будут индуцировать ЭДС в обмотках трансформатора. Реальная амплитуда индукции магнитного поля в рамах B_{\max} определится совокупным гармоническим составом функции магнитной индукции рамы $b(t)$.

Расчет магнитного режима

Расчет магнитного режима непосредственно в эквивалентной схеме замещения (рис. 2) связан со значительными математическими трудностями [8, 9]. Для получения более простого и компактного решения авторами предложена математическая модель-схема, представленная на рис. 3.

Исследуемая схема состоит из трех отдельных (несвязанных) нелинейных катушек индуктивности, подключенных по схеме звезды без нулевого провода к симметричному трехфазному генератору с фазными напряжениями:

$$u_a(t) = U_m \sin \omega t; \quad (8)$$

$$u_b(t) = U_m \sin(\omega t - 120^\circ); \quad (9)$$

$$u_c(t) = U_m \sin(\omega t + 120^\circ), \quad (10)$$

где U_m – фазное напряжение; t – время.

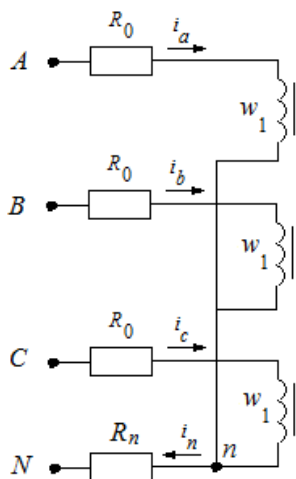


Рис. 3. Математическая модель-схема трансформатора:

i_a, i_b, i_c – фазные токи; i_n – ток в нейтральном проводе;
 w_1 – количество витков в обмотке; R_0 – активное
 сопротивление нелинейных катушек;
 R_n – сопротивление на нулевом проводе;
 A, B, C, N – фазы; n – нейтральная точка

Fig. 3. Mathematical model diagram of transformer:

i_a, i_b, i_c – phase currents; i_n – current in neutral wire;
 w_1 – number of turns in winding; R_0 – active resistance
 in non-linear coils; R_n – resistance in zero wire;
 A, B, C, N – phases; n – neutral point

Вебер-амперные характеристики катушек $i(\psi)$ рассчитывали для отдельных рам магнитопровода и аппроксимировали степенным полиномом вида

$$i = a\psi + b\psi^9. \quad (11)$$

Как следует из свойства симметричной трехфазной системы, при отсутствии нулевого провода гармоники, кратные трем, будут отсутствовать в фазных токах $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$, и наряду с основной гармоникой появятся в фазных напряжениях $u_{an}(t), u_{bn}(t), u_{cn}(t)$ и соответственно в магнитных потоках $\psi(t)$ и магнитных потоках $\phi_{ab}(t), \phi_{bc}(t), \phi_{ca}(t)$ катушек.

Следует отметить, что магнитный режим отдельных катушек на рис. 3 полностью соответствует магнитному режиму в рамках магнитопровода рис. 2. На рис. 3 последовательно с нелинейными катушками включены сравни-

тельно небольшие по величине сопротивления R_0 , а в нулевой провод – достаточно большое сопротивление R_n ($\approx 1000R_0$). Наличие этих элементов в расчетной схеме не приводит к существенным погрешностям в вычислениях, но позволяет решить систему дифференциальных уравнений численным методом на ЭВМ по стандартной программе.

Электрическое состояние расчетной схемы на рис. 3 описывается системой уравнений Кирхгофа в дифференциальной форме, которая дополняется уравнениями аппроксимации вебер-амперных характеристик $i(\psi)$ для отдельных катушек:

$$i_n = i_a + i_b + i_c; \quad (12)$$

$$i_a R_0 + \frac{d}{dt} \psi_a + i_n R_n = u_a(t); \quad (13)$$

$$i_b R_0 + \frac{d}{dt} \psi_b + i_n R_n = u_b(t); \quad (14)$$

$$i_c R_0 + \frac{d}{dt} \psi_c + i_n R_n = u_c(t); \quad (15)$$

$$i_a = a\psi_a + b\psi_a^9; \quad (16)$$

$$i_b = a\psi_b + b\psi_b^9; \quad (17)$$

$$i_c = a\psi_c + b\psi_c^9. \quad (18)$$

Систему дифференциальных уравнений решали численным методом в MathCad по программе Rkadapt [10]. В результате получены функции потокоцеплений катушек $\psi_a(t), \psi_b(t), \psi_c(t)$ и магнитных индукций $b_a(t), b_b(t), b_c(t)$, а также функции намагничивающих токов $i_a(t), i_b(t), i_c(t)$. Далее выполняли гармонический анализ полученных функций. Амплитуду индукции основной гармоники B_{1m} задавали фазным напряжением U_m . Исследование проводили в диапазоне B_{1m} , равном 0,7–2,1 Тл. Диаграммы функций намагничивающего тока $i_a(t)$ и магнитной индукции рамы $b_a(t)$ и их гармонических составов показаны на рис. 4, 5, а значения индукций – в табл. 1.

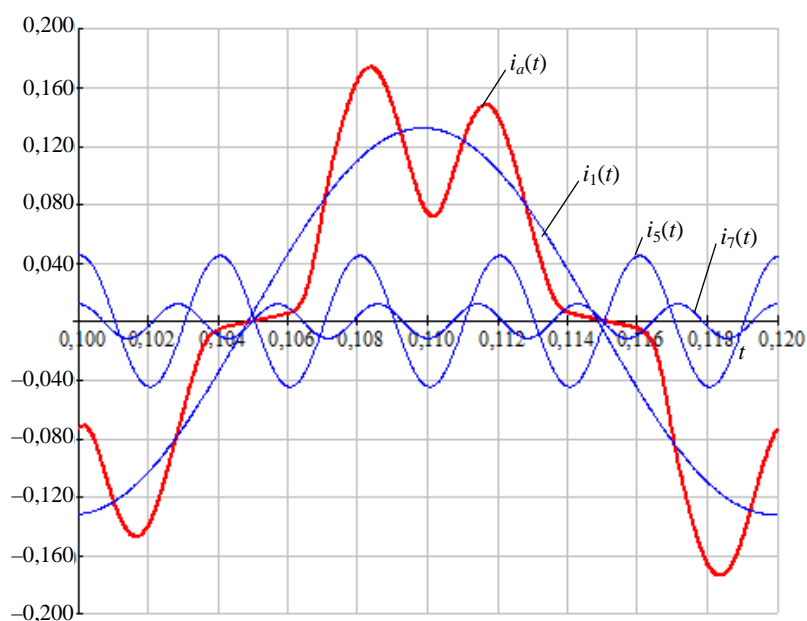


Рис. 4. Диаграмма функции намагничивающего тока $i_a(t)$ и его гармонический состав:
 $i_1(t)$, $i_5(t)$, $i_7(t)$ – функции соответствующих гармоник $i_a(t)$

Fig. 4. Function diagram of magnetizing current $i_a(t)$ and its harmonic composition:
 $i_1(t)$, $i_5(t)$, $i_7(t)$ – functions of corresponding harmonics $i_a(t)$

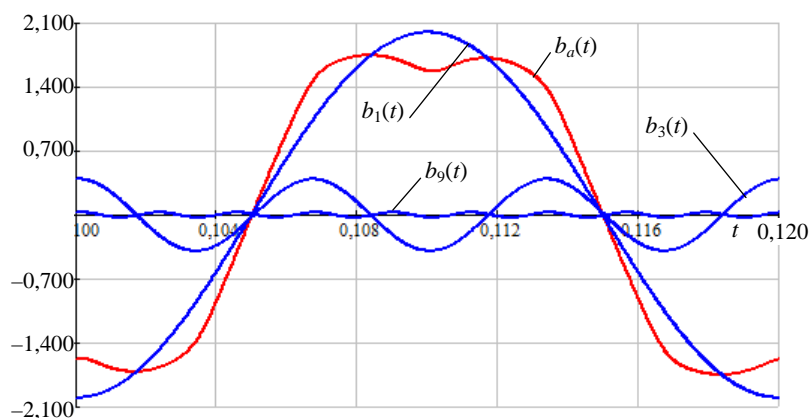


Рис. 5. Диаграмма функции магнитной индукции рамы $b_a(t)$ и ее гармонический состав:
 $b_1(t)$, $b_3(t)$, $b_9(t)$ – функции соответствующих гармоник $b_a(t)$

Fig. 5. Function diagram of magnetic frame induction $b_a(t)$ its harmonic composition:
 $b_1(t)$, $b_3(t)$, $b_9(t)$ – functions of corresponding harmonics $b_a(t)$

Таблица 1

Значения индукций

Induction values

B_{lm} , Тл	2,100	2,000	1,900	1,800	1,700	1,600	1,500	1,400	0,700
B_{mr} , Тл	1,814	1,729	1,643	1,558	1,468	1,382	1,297	1,211	0,606
B_{max} , Тл	1,829	1,746	1,664	1,591	1,519	1,455	1,394	1,331	0,699
$\frac{B_{max}}{B_{mr}}$, о.е.	1,008	1,01	1,013	1,022	1,035	1,053	1,075	1,099	1,154

ВЫВОД

В процессе проведения экспериментов выявлено, что: амплитуда индукции основной гармоники магнитного поля в рамах магнитопровода B_{1m} больше расчетного значения индукции B_{mr} в $\frac{2}{\sqrt{3}}$ раз, или на 15,5 %; вследствие

нелинейности вебер-амперных характеристик рам и свойств трехфазной системы в функциях магнитной индукции отдельных рам возникают гармонические составляющие, кратные трем (рис. 5); высшие гармоники функции магнитной индукции рамы $b(t)$, накладываясь на основную гармонику, уменьшают реальную амплитуду индукции магнитного поля B_{max} практически до расчетного значения индукции B_{mr} в рабочем диапазоне реальной амплитуды, при этом коэффициенты высших гармоник изменяются незначительно; в намагничивающих токах отсутствуют гармонические составляющие, кратные трем (рис. 4).

ЛИТЕРАТУРА

1. Витой пространственный магнитопровод трехфазного трансформатора: пат. 1658223 СССР: МПК: H01F 27/24 / Г. Б. Андреев, Л. Н. Стабровский; дата публ.: 23.06.1991.
2. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия: ГОСТ 21427.1–83. Введ. 01.01.1984. М.: Издательство стандартов, 1983. 17 с.
3. Чайковский, В. П. Перспективы применения конструкций магнитных систем трансформаторов из витых элементов / В. П. Чайковский, В. А. Матухно, С. А. Игнатенко // Электромашиностроение и электрооборудование. 2007. № 68. С. 48–51.
4. Авдеева, Е. А. Потери активной мощности в трехфазных трансформаторах с круговыми и шестигранными образующими контурами стержней витых пространственных магнитопроводов / Е. А. Авдеева, Р. А. Ставинский // Электротехника и электроника / Нац. техн. ун-т «Харьков. политехн. ин-т». 2014. № 2. С. 14–17.
5. Мазуренко, А. А. Исследование и расчет магнитного режима трехфазного трансформатора с витым пространственным магнитопроводом / А. А. Мазуренко. М., 1970. С. 186.
6. Дружинин, В. В. Магнитные свойства электротехнической стали / В. В. Дружинин. М.: Энергия, 1974. 240 с.
7. Дубров, Н. Ф. Электротехнические стали / Н. Ф. Дубров, Н. И. Лапкин. М.: Metallurgizdat, 1963. 384 с.

8. Копылов, И. В. Электрические машины. М.: Энергоатомиздат, 1986. 360 с.
9. Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов / П. М. Тихомиров. М.: Энергоатомиздат, 1986. 528 с.
10. Бладыко, Ю. В. Применение MathCad в решении задач электротехники. Ч. 2: Переходные процессы. Нелинейные электрические цепи. Теория электромагнитного поля / Ю. В. Бладыко, А. А. Мазуренко, И. В. Новаш. Минск: БНТУ, 2013.

Поступила 20.12.2016

Подписана в печать 17.02.2017

Опубликована онлайн 28.03.2017

REFERENCES

1. Andreev G. B., Stabrovsky L. N. (1991) *Stranded Spatial Magnetic Conductor of 3-Phase Transformer*. Patent No 1658223 USSR (in Russian).
2. State Standard 21427.1–83. *Electrotechnical Cold-Rolled Anisotropic Sheet Steel. Technical Specifications*. Moscow, Publishing House of Standards, 1983. 17 (in Russian).
3. Tchaikovsky V. P., Matukhno V. A., Ignatenko S. A. (2007) Prospects for Application of Transformer Magnetic Systems with Stranded Elements. *Elektromashinostryeniye i Elektrooborudovanie* [Electric Machine Engineering and Electric Equipment], (68), 48–51 (in Russian).
4. Avdeeva E. A., Stavinsky R. A. (2014) Losses of Active Power in 3-Phase Transformers with Circular and Hexagonal Forming Contours of Cores in Stranded Spatial Magnetic Conductors. *Elektrotehnika i Elektronika* [Electrical Engineering and Electronics], (2), 14–17 (in Russian).
5. Mazurenko A. A. (1970) *Investigations and Calculation of Magnetic Mode for 3-Phase Transformer with Stranded Spatial Magnetic Conductor*. Moscow. 186 (in Russian).
6. Druzhinin V. V. (1974) *Magnetic Properties of Electrotechnical Steel*. Moscow, Energiya Publ. 240 (in Russian).
7. Dubrov N. F., Lapkin N. I. (1963) *Electrotechnical Steel*. Moscow, Metallurgizdat Publ. 384 (in Russian).
8. Kopylov I. V. (1986) *Electric Machines*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 360 (in Russian).
9. Tikhomirov P. M. (1986) *Calculations of Transformers*. Moscow, Energoatomizdat Publ. 528 (in Russian).
10. Bladyko Yu. V., Mazurenko A. A., Novash I. V. (2013) *Application of MathCad for Solution of Problems in Electrical Engineering. Part. 2. Transient Processes. Nonlinear Electric Circuit. Theory of Electromagnetic Field*. Minsk, Belarusian National Technical University. [Electronic Resource] (in Russian).

Received: 20.12.2016

Accepted: 17.02.2017

Published online: 28.03.2017